

RESISTÊNCIA AO FOGO DE COLUNAS AXIALMENTE COMPRIMIDAS COM SECÇÕES ELÍTICAS OCAS EM AÇO INOXIDÁVEL

Flávio Arrais^a, Nuno Lopes^a e Paulo Vila Real^a

^a *RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro*

Resumo. A utilização do aço inoxidável na construção como material estrutural tem aumentado nos últimos anos devido a vantagens como a resistência à corrosão e aparência estética. Além disso possui uma maior resistência ao fogo quando comparado com o aço carbono, potenciando a possível ausência de proteção. Este trabalho apresenta um estudo numérico da resistência de colunas sujeitas a compressão axial, com secção elítica oca em aço inoxidável, a temperaturas elevadas. As capacidades resistentes últimas destes perfis foram obtidas aplicando modelos em elementos finitos e os respetivos resultados numéricos comparados com as prescrições do Eurocódigo 3, tendo-se concluído que esta metodologia se encontra desajustada para o tipo de perfis aqui analisados.

1. Introdução

A aplicação do aço inoxidável como elemento estrutural na construção tem aumentado ao longo dos últimos anos devido a diversas vantagens, como por exemplo a sua durabilidade, resistência à corrosão e a sua aparência estética [1,2]. Apesar de apresentar custos iniciais elevados, o aço inoxidável pode ser um material competitivo se for considerado o custo ao longo do seu ciclo de vida, uma vez que apresenta uma menor necessidade de manutenção. Adicionalmente, possui uma maior resistência ao fogo quando comparado com o aço carbono [3], potenciando desta forma a possível ausência de proteção nestes elementos.

As classes dos aços inoxidáveis mais frequentemente utilizados para aplicações estruturais são os austeníticos, mas atualmente tem-se verificado um crescente interesse nos ferríticos e austeníticos-ferríticos (Duplex) devido a vantagens específicas de cada um destes referidos grupos. Os ferríticos apresentam a vantagem de possuir menor percentagem de níquel na sua composição química, diminuindo desta forma o seu custo inicial, mas mantendo a sua resistência quer à corrosão quer estrutural. Por outro lado os Duplex apresentam uma boa resistên-

cia de suporte de cargas mas também uma elevada resistência à corrosão e ao desgaste. A aplicação destes aços inoxidáveis é comum em edifícios de diferentes tipologias, torres, suportes de coberturas e pontes (pedonais e rodoviárias) [1, 3-6].

A opção por secções transversais, como é o caso de secções elíticas ocas, que potenciem a aparência estética é muitas vezes um fator decisivo no projeto de estruturas metálicas. A juntar a esta natureza estética e à facilidade de fabrico destes perfis, a secção elítica oca integra os atributos arquitetónicos da secção circular oca e as vantagens estruturais da secção retangular oca [7]. Adicionalmente a esta característica, por serem secções fechadas, possuem um melhor comportamento à torção e devido à sua forma têm uma superior resistência à flexão, quando comparado com perfis circulares ocos, importante para solicitações à flexão composta. Aliar a aplicação de elementos em aço inoxidável com a escolha de secções transversais elíticas ocas apresenta-se assim como uma opção interessante em termos de projeto.

Relativamente ao comportamento estrutural de perfis elíticos ocos à temperatura normal, existem já alguns estudos recentes destes elementos sujeitos a compressão [7,8]. No entanto, seu comportamento a elevadas temperaturas não é ainda conhecido.

Assim, este trabalho apresenta um estudo numérico sobre a resistência de colunas sujeitas a compressão axial, com secção transversal elítica oca, em aço inoxidável, a temperaturas elevadas. O estudo numérico é realizado por meio de análises geométrica e materialmente não-lineares com imperfeições, utilizando o programa de elementos finitos SAFIR [9]. São consideradas diferentes classes de aço inoxidável, que apresentam diferentes leis constitutivas a elevadas temperaturas [3]. São analisados o aço austenítico 1.4301 (também conhecido por aço 304), o aço ferrítico 1.4003 e o duplex 1.4462.

O Eurocódigo 3 (EC3) [3] recomenda a verificação dos elementos estruturais em aço inoxidável aplicando a mesma metodologia de cálculo desenvolvida para o aço carbono, consideradas imprecisas e inseguras em estudos anteriores [10]. Com base no referido estudo numérico, a precisão da aplicação das fórmulas do EC3 e da proposta para colunas em aço inoxidável [10] é avaliada para colunas com secções elíticas.

2. Dimensionamento ao fogo

Na presente secção são apresentadas as metodologias de cálculo simplificadas analisadas para o cálculo da resistência à compressão de colunas em aço inoxidável em situação de incêndio. O cálculo da resistência da secção, assim como a resistência do elemento, é apresentado segundo as regras do Eurocódigo e segundo uma proposta de cálculo com as devidas adaptações ao caso de estudo apresentado.

2.1 Eurocódigo 3

De acordo com a EN 1993-1-2 [3], a resistência da secção de um elemento em aço inoxidável ao fogo é calculada através do mesmo procedimento que para o aço carbono, alterando apenas as propriedades mecânicas do material para consideração das temperaturas elevadas na secção. Relativamente à classificação da secção transversal, foi considerada a Eq. (1) para calcular o parâmetro ε_θ , necessário para a determinação dos limites de classificação do EC3 [11].

$$\varepsilon_\theta = 0.85 \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0.5} \quad (1)$$

O valor de resistência da secção, de elementos axialmente comprimidos com secções de Classe 1, 2 ou 3 a uma temperatura uniforme, deve ser determinado a partir da Eq. (2).

$$N_{fi,t,Rd} = A f_{y,\theta} / \gamma_{M,fi} \quad (2)$$

Para secções da Classe 4, de acordo com o Anexo E da EN 1993-1-2, deve ser considerada a área efetiva (A_{eff}) em vez da área bruta da secção transversal.

Em situação de incêndio, são aceitáveis maiores deformações quando comparadas com as deformações obtidas à temperatura normal. Desta forma, em vez da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% normalmente utilizada à temperatura normal, para secções das Classes 1, 2 e 3 a temperaturas elevadas, a tensão correspondente a uma extensão total de 2% deve ser adotada como tensão de cedência [3], como se apresenta na Eq. (3).

$$f_{y,\theta} = f_{2,\theta} = k_{2,\theta} f_y \quad (3)$$

No entanto, para secções transversais da Classe 4, de acordo com o Anexo E da EN 1993-1-2, deve ser utilizada como tensão de cedência a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, Eq. (4).

$$f_{y,\theta} = f_{0.2p,\theta} = k_{0.2p,\theta} f_y \quad (4)$$

Os fatores de redução da tensão de cedência apresentados encontram-se no Anexo C da EN 1993-1-2 para o aço inoxidável a temperaturas elevadas, para os diferentes tipos de aço inoxidável analisados.

O valor de resistência à encurvadura, de elementos axialmente comprimidos com secções de Classe 1, 2 ou 3 a uma temperatura uniforme, deve ser determinado a partir da Eq. (5).

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A f_{y,\theta} / \gamma_{M,fi} \quad (5)$$

Conforme já referido para secções da Classe 4, a área efetiva (A_{eff}) deve ser considerada em vez da área bruta da secção transversal.

O valor de $\chi_{i,fi}$, coeficiente de redução para a encurvadura em situação de incêndio, pode ser obtido de acordo com a seguinte Eq. (6):

$$\chi_{i,fi} = \frac{1}{\phi_{i,\theta} + \sqrt{[\phi_{i,\theta}]^2 - [\bar{\lambda}_{i,\theta}]^2}} \leq 1,0 \quad (6)$$

com

$$\phi_{i,\theta} = \frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_{i,\theta} + (\bar{\lambda}_{i,\theta})^2] \quad (7)$$

em que α é o fator de imperfeição dado por:

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (8)$$

No caso da temperatura uniforme ao longo de toda a secção transversal, o valor da esbelteza adimensional normalizada $\bar{\lambda}_\theta$ é dado pela Eq. (9):

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (9)$$

onde $k_{y,\theta} = k_{0.2p,\theta}$ para secções de Classe 4, e $k_{E,\theta}$ é o fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a atingida no instante t .

A esbelteza normalizada à temperatura normal, $\bar{\lambda}$, é dada pela Eq (10):

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \quad (10)$$

Onde a área efetiva (A_{eff}) deve ser considerada em vez da área bruta da secção transversal para secções da Classe 4. O valor da carga crítica de Euler, N_{cr} , é dado pela Eq. (11), onde L é o comprimento do elemento:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (11)$$

O valor da área efetiva (A_{eff}) é calculado segundo a proposta de Chan e Gardner [12] para secções elíticas ocas:

$$A_{eff} = A \left[\frac{90}{D_e/t} \frac{235}{f_y} \right]^{0.5} \quad (12)$$

considerando o diâmetro equivalente $D_e = 2a^2/b$, cujas variáveis se encontram representadas no esquema da Fig. 1.

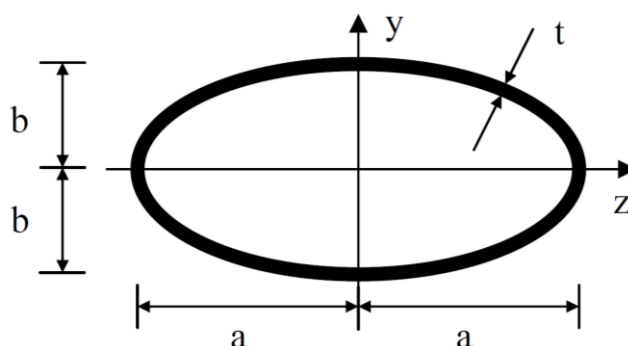


Fig. 1: Geometria de uma secção elítica oca

2.2 Proposta para o cálculo da resistência à compressão axial de perfis I Classe 1 e 2

De acordo com um estudo realizado em colunas de secção I de Classe 1 e 2 [10] desenvolveu-se uma nova proposta para o cálculo da resistência à compressão mantendo a formulação principal proposta pelo EC3 e modificando os seguintes parâmetros.

$$\chi_{i,fi} = \frac{1}{\phi_{i,\theta} + \sqrt{[\phi_{i,\theta}]^2 - \beta[\bar{\lambda}_{i,\theta}]^2}} \leq 1,0 \quad (13)$$

com

$$\phi_{i,\theta} = \frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_{i,\theta} + \beta (\bar{\lambda}_{i,\theta})^2] \quad (14)$$

em que o α considerado é uma simplificação que garante a segurança e um nível de precisão aceitável no dimensionamento destes elementos, onde a única alteração em relação à expressão do EC3 é o fator de imperfeição que para os aços inoxidáveis passa a ser dado por:

$$\alpha = 1,5 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (15)$$

O parâmetro β é igual a 1.0 para os casos da encurvadura segundo o eixo forte e 1.5 para os casos da encurvadura segundo o eixo fraco. Apesar de o estudo [10] ter sido realizado para outras secções diferentes das elíticas tubulares e ao mesmo tempo não abranger todas as classes da secção, o EC3 não especifica regras de cálculo para o tipo de secção em questão pelo que o raciocínio a efetuar é o mesmo independentemente da secção em causa.

3. Modelação numérica

Neste ponto são exibidos os diferentes casos de estudo analisados. São apresentados os detalhes da elaboração do modelo numérico aplicado e as diferentes propriedades materiais consideradas para o estudo paramétrico.

3.1 Casos de estudo

No presente estudo foram analisadas duas secções elíticas ocas com as mesmas dimensões mas diferentes espessuras. As secções elíticas designadas por EHS_200x100x4.0 e EHS_200x100x8.0 foram analisadas segundo o eixo fraco e o eixo forte. Os comprimentos variam entre 1 m e 15 m de forma a abranger um intervalo de diferentes esbeltezas ajustado (entre 0.1 e 2.0). Consideraram-se colunas em aço inoxidável da classe 1.4301 (austenítico), 1.4003 (ferrítico) e 1.4462 (duplex) submetidas às temperaturas elevadas uniformes de 350°C, 500°C, 600°C e 700°C. A temperatura de 350°C corresponde à temperatura crítica recomendada para perfis com secções de Classe 4 quando não é realizado nenhum cálculo e as restantes representam as temperaturas críticas características neste tipo de elementos estruturais.

3.2 Modelo numérico

Para a determinação da carga última de cada modelo foi utilizado o programa de elementos finitos SAFIR [9], considerando elementos de casca com quatro nós e seis graus de liberdade por nó (três translações e três rotações). As condições de apoio de simplesmente apoiado foram aplicadas em ambas as extremidades, impedido o deslocamento nas duas direções perpendiculares ao eixo longitudinal do elemento, e a meio vão, impedido o deslocamento segundo o eixo longitudinal do elemento de forma a garantir a simetria do elemento e dos esforços. As cargas foram aplicadas verticalmente, paralelas ao elemento, nas extremidades do modelo distribuídas pela superfície da secção. A Fig. 2 apresenta os modelos de elementos de casca representando as condições de apoio e as superfícies aplicadas para aplicação das restrições e responsáveis pelo fecho da secção tubular nas extremidades. As placas de extremidade estão à temperatura normal e possuem 10x a espessura da secção do elemento.

Em relação às imperfeições geométricas, estas foram introduzidas no modelo numérico com a forma dos modos de encurvadura obtidos com o programa CAST3M [13] (aplicando a interface RUBY [14]) conforme visível na Fig. 3. Para a amplitude das imperfeições locais considerou-se 80% de (a ou b)/100 e para as imperfeições globais 80% de L/1000, de acordo com o Anexo C da EN 1993-1-5 [15] e as tolerâncias geométricas de fabrico descritas em D.1 do Anexo D da norma EN 1090-2+A1 [16] e EN 10219-2 [17], onde “a” e “b” representam as dimensões nas duas direções y e z das secções elíticas e L o comprimento do elemento em causa. Seguindo as recomendações da EN 1993-1-5, foi introduzida a combinação das imperfeições geométricas anteriormente enunciadas. Segundo a norma, tendo como base os diferentes modos de encurvadura, é necessário escolher uma imperfeição de base (a que confere menor valor de resistência ao elemento) à qual se adicionam as restantes com os seus valores reduzidos para 70% do seu valor total.

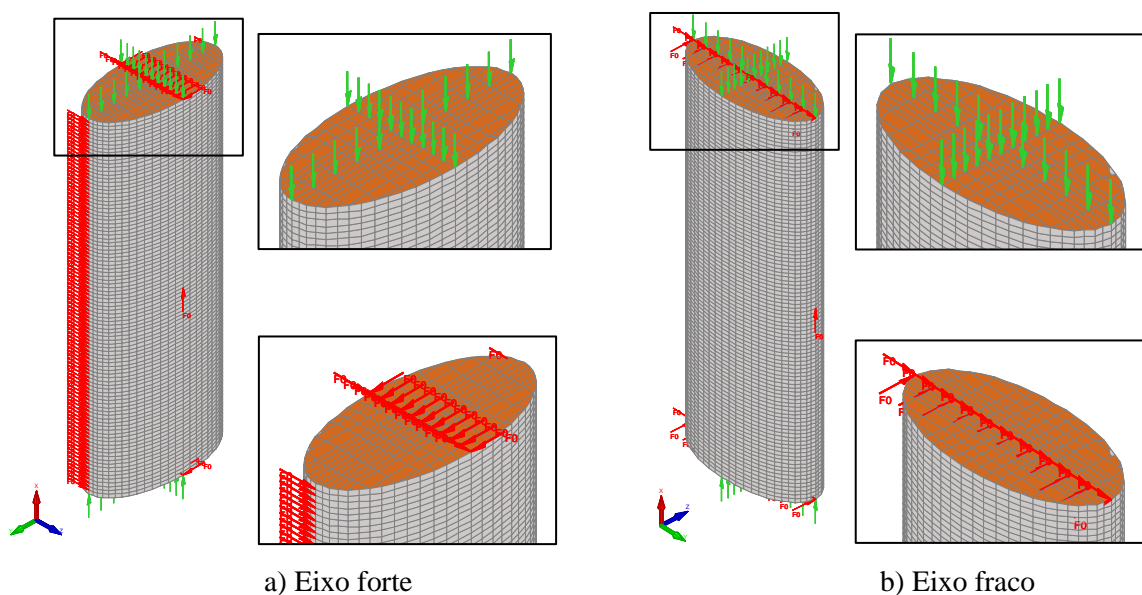


Fig. 2: Modelo numérico EHS com pormenor de restrições e cargas aplicadas segundo a) eixo forte e b) eixo fraco.

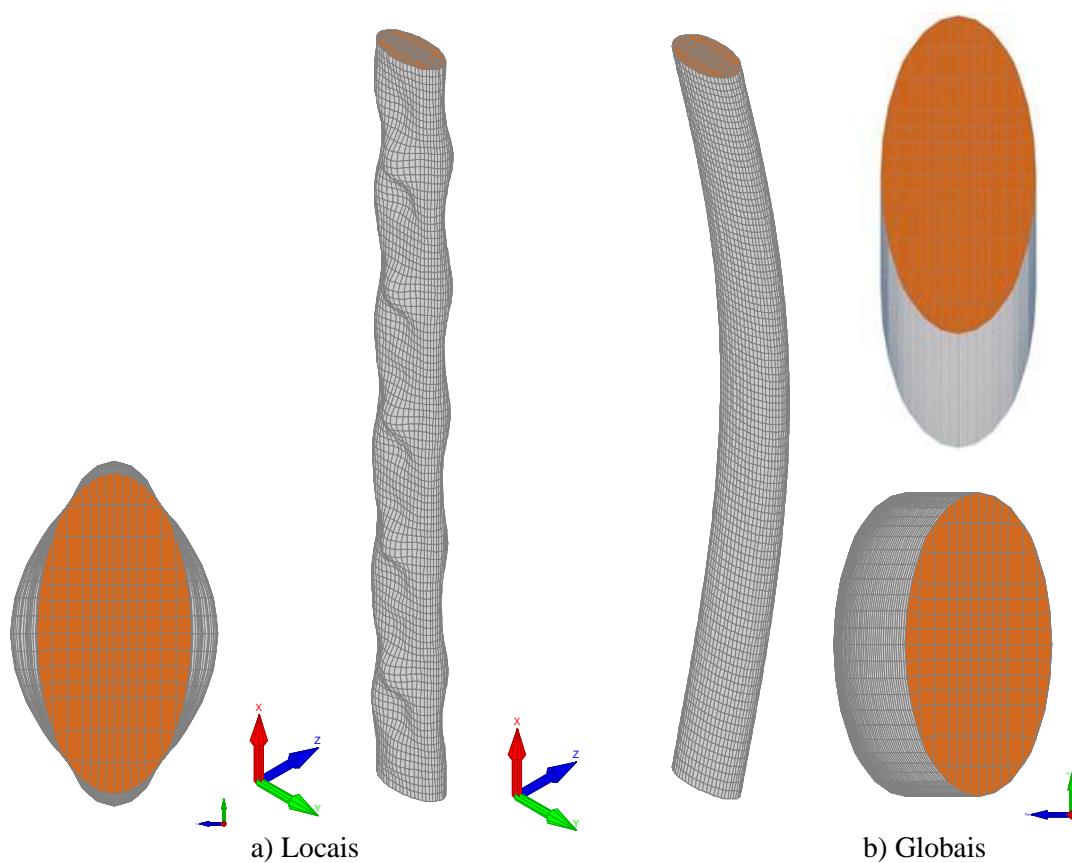


Fig. 3: Imperfeições geométricas ampliadas dos elementos com secção elítica a) locais e b) globais

Na Tabela 1 encontram-se os valores nominais da tensão de cedência (f_y), da tensão última (f_u) e do módulo de elasticidade (E) dos modelos de diferentes tipos de aço inoxidável.

Tabela 1: Valores nominais para os diferentes tipos de aço inoxidável [4]

Tipo	Classe	Tensão de cedência f_y		Tensão última f_u		Módulo de Elasticidade E (GPa)
		(MPa)		(MPa)		
		$t \leq 6mm$	$t \leq 12mm$	$t \leq 6mm$	$t \leq 12mm$	
Austenítico	1.4301	230	210	540	520	200
Ferrítico	1.4003	280	280	450	450	220
Duplex	1.4462	480	460	660	660	200

Estas propriedades mecânicas são reduzidas a temperaturas elevadas conforme os valores apresentados no Anexo C da EN 1993-1-2. Os valores apresentados refletem grandes diferenças do aço carbono e do aço inoxidável principalmente a partir dos 600°C, que terão influência na análise dos resultados obtidos numericamente quando comparados com o EC3.

4. Estudo paramétrico

Na presente secção apresenta-se a comparação entre a metodologia de cálculo preconizada pelo EC3, a proposta para o cálculo da resistência à compressão axial de perfis I Classe 1 e 2 (denominada por “Proposta UA”) e os resultados obtidos após a análise numérica com o recurso ao programa SAFIR. Os resultados foram agrupados por classe de aço. O valor de χ_{fi} é obtido entre o quociente entre a carga última do elemento e o esforço axial máximo resistente da secção para cada temperatura, ambos obtidos pelo SAFIR (Fig. 4-6). Quanto às diferentes curvas, o mesmo raciocínio foi aplicado tendo em conta cada metodologia de cálculo. Nos casos das secções classificadas como sendo de Classe 4 foi utilizada como tensão de cedência a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, $f_{0.2p,\theta}$, nas as formulações apresentadas.

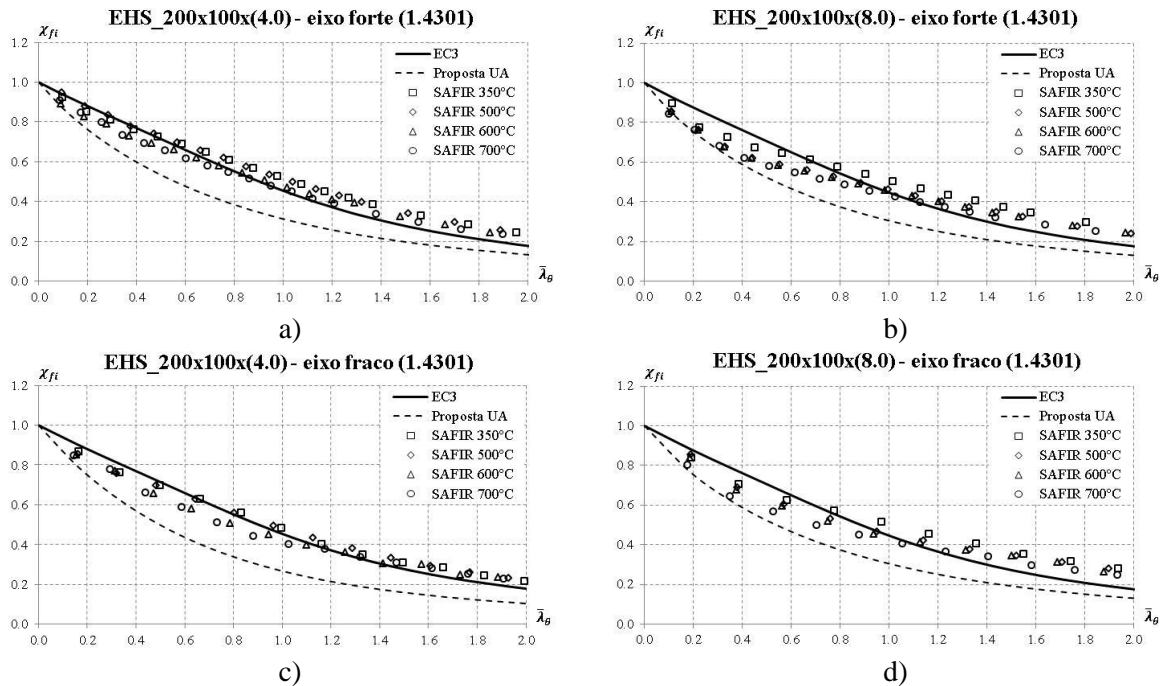


Fig. 4: Resultados numéricos de colunas em aço inoxidável com secções elíticas ocas para o aço inoxidável austenítico 1.4301 vs. EC3 e Proposta UA a elevadas temperaturas.

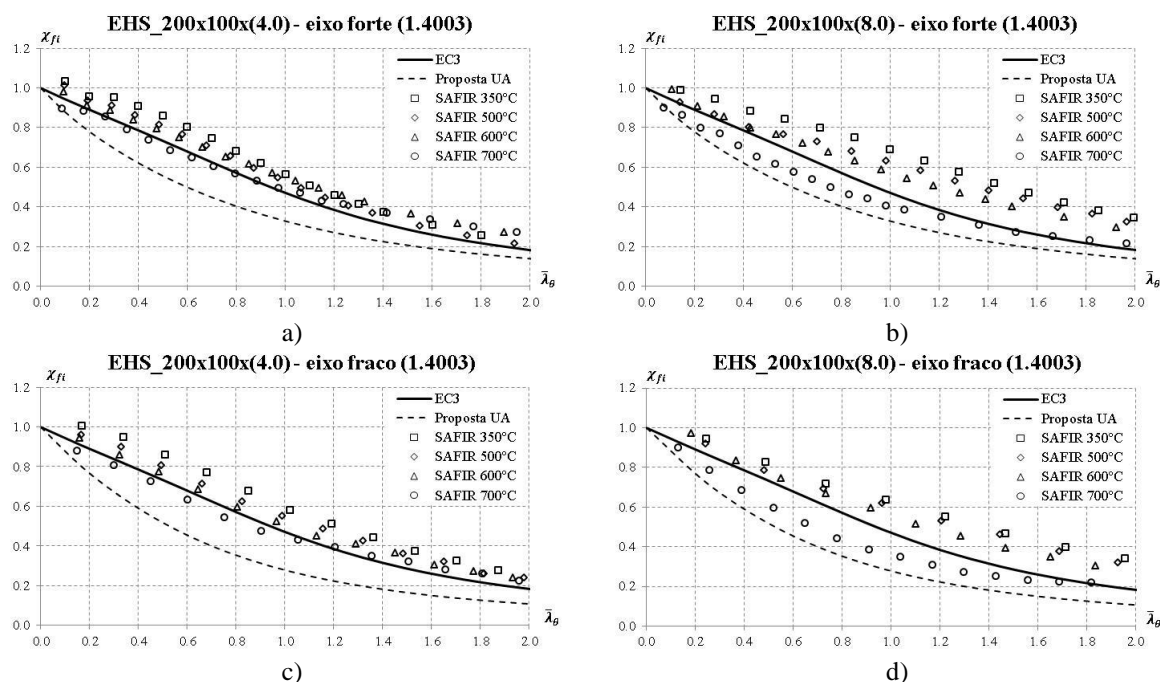


Fig. 5: Resultados numéricos de colunas em aço inoxidável com secções elíticas ocas para o aço inoxidável ferrítico 1.4003 vs. EC3 e Proposta UA a elevadas temperaturas.

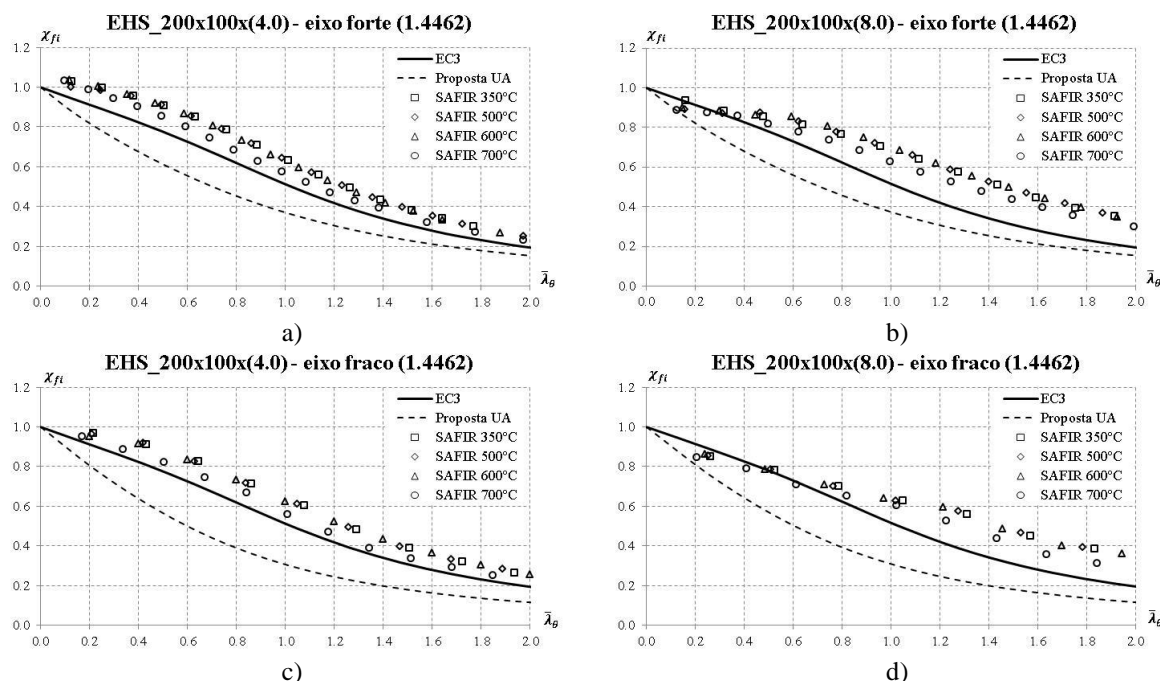


Fig. 6: Resultados numéricos de colunas em aço inoxidável com secções elíticas ocas para o aço inoxidável duplex 1.4462 vs. EC3 e Proposta UA a elevadas temperaturas.

Observando os resultados dos gráficos das Fig. 4-6 pode-se constatar que, para esbeltezas pequenas e médias, o EC3 se encontra fora da segurança para uma grande parte dos resultados, nomeadamente para o aço inoxidável austenítico. No caso do aço inoxidável ferrítico o mesmo também se observa para a temperatura de 700°. Esta diferença obtida para os 700°C, comparativamente às restantes temperaturas, deve-se à descida abrupta dos fatores de redução apresentados no Anexo C da EN 1993-1-2, para temperaturas acima de 600°C. A “Proposta UA” encontra-se do lado da segurança, mas é demasiado conservativa.

5. Conclusões

No presente trabalho foi apresentado um estudo numérico sobre o comportamento ao fogo de colunas com secções elíticas ocas em diferentes classes de aço inoxidável (austenítico, ferrítico e duplex).

Para compreender melhor o comportamento ao fogo destes elementos em aço inoxidável foram analisados dois perfis de diferentes classes de secção, com diferentes esbeltezas, para várias temperaturas elevadas. Para além destas variáveis, os elementos foram analisados em ambas as direções dos seus eixos principais.

Este estudo permitiu concluir que o EC3 não fornece uma metodologia adequada de cálculo, sendo por vezes insegura quando comparada com a capacidade de carga última obtida numericamente. No seguimento, uma proposta desenvolvida pela Universidade de Aveiro para colunas de secção I de Classe 1 e 2 foi analisada e observou-se que a aplicação desta proposta permitiu superar a insegurança observada anteriormente para a grande maioria dos casos analisados, mas de forma demasiado conservativa, concluindo-se que ambas as curvas das metodologias analisadas não se encontram ajustadas aos valores obtidos numericamente.

A resistência ao fogo de elementos estruturais axialmente comprimidos, com secções elíticas ocas em aço inoxidável, ainda não é completamente conhecida, motivando desta forma a realização de mais estudos abrangendo diferentes secções e variáveis com o objetivo do desenvolvimento de formulações mais precisas, melhor ajustadas e mais seguras.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto “StaSteFi - Dimensionamento ao fogo de elementos estruturais em aço inoxidável”, POCI-01-0145-FEDER-030655, suportado pelo orçamento do POCI Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) na sua componente FEDER e pelo orçamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P.

Referências

- [1] Gardner, L. “The use of stainless steel in structures”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, vol. 7, 2005, pp 45-55.
- [2] Euro Inox, SCI, Steel Construction Institute. *Design Manual for Structural Stainless Steel*, 3rd edition, 2006.
- [3] CEN European Committee for Standardisation. *EN 1993-1-2, Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1–2: General rules – Structural fire design*, Belgium, 2005.
- [4] Gardner, L. “Aesthetics, economics and design of stainless steel structures”, *Advanced Steel Construction*, vol. 4, no. 2, 2008, pp 113-122.
- [5] Gardner, L. “Stability and design of stainless steel structures – Review and outlook”, *Thin-Walled Structures*, vol. 141, 2019, pp 208-216.
- [6] Baddoo, N. R. “Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities”, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 64, no. 11, 2008, pp 1199-1206.
- [7] Chen, M.-T.; Young, B. “Material properties and structural behavior of cold-formed steel elliptical hollow section stub columns”, *Thin-Walled Structures*, vol. 134, 2019, pp 111-126.

- [8] McCann, F.; Fang, C.; Gardner, L.; Silvestre, N. "Local buckling and ultimate strength of slender elliptical hollow sections in compression", *Engineering Structures*. Vol. 111, 2016, pp 104-118.
- [9] Franssen, J.-M.; Gernay, T. "Modelling structures in fire with SAFIR®: theoretical background and capabilities", *Journal of Structural Fire Engineering*, 2017.
- [10] Lopes, N.; Vila Real, P.; Simões da Silva, L.; Franssen, J.-M. "Axially loaded stainless steel columns in case of fire", *Journal of Structural Fire Engineering*, vol 1, 2010, pp 43-59.
- [11] Franssen, J.-M.; Vila Real, P. "Fire Design of Steel Structures, ECCS", *Ernst & Sohn, a Wiley Company*, 2nd edition, 2015.
- [12] Chan, T. M.; Gardner, L. (2008). "Compressive resistance of hot-rolled elliptical hollow sections", *Engineering Structures*. Vol. 30, n.º 2, p. 522-532.
- [13] CEA. *CAST 3M research FEM environment. development sponsored by the French Atomic Energy Commission*, <http://www-cast3m.cea.fr/>, 2012.
- [14] Couto, C.; Vila Real, P.; Lopes, N. *RUBY an interface software for running a buckling analysis of SAFIR models using Cast3M*, University of Aveiro, 2013.
- [15] CEN European Committee for Standardisation. *EN 1993-1-5, Eurocode 3, Design of steel Structures – Part 1–5: Plated structural elements*, Belgium, 2006.
- [16] CEN European Committee for Standardisation. *EN 1090-2, Technical requirements for the execution of steel structures*, Belgium, 2011.
- [17] CEN European Committee for Standardisation. *EN 10219-2, Cold Formed Welded Steel Structural Hollow Sections - Part 2: Tolerances, Dimensions and Sectional Properties*, Belgium, 2019.